

## 物質量とモルの授業計画 一方法と展開一 について

森 川 鐵 朗\*・檜 田 豪 利\*\*

(平成14年10月21日受付；平成14年12月20日受理)

### 要 旨

本論文ではまず、物質量とモルを教える方法と発展を概括し、次いで、新しい授業用シートを提案する。ここでの指導法は、現在の化学教科書の伝統とは違って、基礎に「物理量は数値と単位との積」と「量バランス法」をすえている。前者は英語圏でいう quantity calculus における原理であり、後者は物理量を選び比較し等号で結ぶ方法である。このシートではまず、要素粒子を説明する。次に、物質量の新しい定義「要素粒子1個の量 (amount) はどの要素粒子でも同じ」と「系の物質量はその系を構成する要素粒子の物質量の和に等しい」を採用する。生徒は、各種の化学法則を物質量バランスとして学習しながら、量バランス法によって、ある物質量と特別な物質量であるモルを比較し測定する。その結果は「物理量は数値と単位との積」と表記される。最後に、要素粒子の相対質量とモル質量を導入する。

### KEY WORDS

amount of substance	物質量	mole	モル (名称)
elementary entity	要素粒子	amount balance	物質量バランス
one-to-one correspondence	一対一対応	specification	特定 (要素粒子の)
relative atomic mass	相対原子質量	gram-molecule	グラム分子
teaching plan	授業計画	science education	科学教育

### 1 はじめに

英語圏でいう quantity calculus は、物理量を処理する中心的手法であり、国際単位系 (SI) の国際的なコンセンサスをうる背景にもなっている。しかし、日本の科学界ではこの用語の和訳は定まっていない。この方法の第1の原理<sup>1)</sup>は「物理量は数値と単位との積」である。この原理も、日本の科学教育では積極的に取り上げられてこなかったようである。その結果、自然法則や物理量と単位などの指導において、物理量間での比較の方法が意識されてこなかったのだと思われる。以下の授業計画では、物質量とモルを物理量として学習するために、この原理を基礎にすえて展開してある。

物質量の単位であるモルの導入では、単位全般にもいえる注意も必要であろう。単位導入過程は、直接比較 → 間接比較 → 個別単位 → 普遍単位の4段階<sup>2)</sup>に展開される、という。この

\* 上越教育大学自然系教育講座 〒943-8512 上越市山屋敷町1

\*\* 金沢大学教育学部附属高等学校 〒921-8173 金沢市平和町1-1-15

数学指導法における「量より数を抽象していく過程」は、数の導入のために利用されていて、量<sup>3)</sup>に多義的な意味を持たせても、結局は数に統一されていく。例えば「重さはものの量である」では物体の固有の量一般すなわち物理量を指し、温度変化による膨張では「量はかわらないけれど、かさは増える」では個別の物理量すなわち質量のことであり、単位量の「いくつ分の量」では数値を意味している。一方、自然科学では、これらの例にみられるような、いろいろな量の違いこそ関心ごとであり、科学学習ではそれらを個々に区別し指導しなくてはならない。自然科学教育で単位を物理量—科学教育における量—として導入する過程は、算数・数学教育とは学習目標が異なるのである。科学教育では、個々の物理量の性質（長さの加法性や質量の保存性など）や物理量の測定原理（比較する方法の基本）や物理量の次元（比較し同一視した物理量の類）など<sup>4)</sup>が、単位の学習事項となる。したがって、物理量としての単位の概念構築は、比較 → 同一視 → 集積 → 命名と流れて次元となり、次元の中からその次元の単位が選択される。物理量ごとに固有の比較と均衡（バランス、釣り合い）の方法を学ぶと同時に、自然法則を学ぶことになるのである。物質でいえば、物質同士をバランスさせる（物質量を等号で結ぶ方法を知る）ことが、化学の法則を学ぶことに連なるのである。モルの授業計画では、物理量の次元を（生徒に明示しなくとも背景に）意識していなければならない。

SI の定義<sup>5,6)</sup>では「モルは 0.012 kg（厳密に）の炭素 12 の中に存在する原子の数に等しい数の要素粒子を含む系の物質質量であり、単位の記号は mol」である。この定義の骨格は「モルは…系の物質質量」となっている。そこで、物質質量の説明として、高校教科書<sup>7)</sup>のような「モルで測定される物質の量」を採用しては、循環論法に陥ってしまう。物質質量とモルの学習計画を立てるためには、そのような論理的な破綻がないように、そして、物質質量<sup>8)</sup>の歴史的な発展<sup>9-11)</sup>や現状<sup>12,13)</sup>や現代の方法<sup>14,15)</sup>も検討しなくてはならない。最後に、本稿の考え方を集約して、物質質量とモルを学習するための指導法を生徒用シートとしてまとめる。

## 2 物質質量とモルの方法と発展について

同種の物理量の商<sup>10)</sup>は、自然科学で広く使われてきた。例えば、物体の密度と水の密度の商は比重とよばれていた。「物理量は数値と単位との積」からみれば、分母の物理量が単位で、商は数値となる。しかし、分母が忘れられがちであいまいになるためか、この型の商は推奨されなくなって<sup>11)</sup>いる。化学の典型的な量商は、要素粒子 B の 1 個の相対質量（相対原子質量、原子量、相対分子質量、分子量など）で、以下  $A_r(B)$  と表す。要素粒子としては原子や分子やイオンなどを組み合わせる。ただし、学習シートでは、イオンをはずしてある。物質質量  $n(B)$  の構成には要素粒子が欠かせないので、以下の生徒用シートでは、学習の第 1 ステップとして要素粒子を取り上げる。次に、 $n(B)$  を導入し、 $A_r(B)$  とモル質量  $M(B)$  は別途に説明すると、シートのような自然な流れとなる。学習シートその 2 では、要素粒子 1 個の物質質量  $m_a(B)$  を導入<sup>15)</sup>し、順次、系の物質質量  $n(B)$  へと発展させる。後述のように、 $A_r(B)$  は  $n(B)$  そのものの導入には不要であるのに、現在の高校教科書<sup>7)</sup>では両者を強く関連させて教えている。この連関は、グラム分子をモルとよんだ時代のなごりであろうか。

炭素 12 の 1 個の質量<sup>6)</sup>  $m_a(^{12}\text{C})$  の  $1/12$  を統一原子質量単位 unified atomic mass unit とよび、記号として  $m_u$  や  $u$  や Da（ドルトン）をあてる。採録されている（おおよその）測定値を、次の第 1 行の（ ）の中に示す。そこで、ある要素粒子 B の 1 個の質量  $m_a(B)$  をこ

の  $m_u$  を単位として測定する。すると、第2式のように「物理量＝数値×単位」と表記される。このときの数値が  $A_r(B)$  である。IUPAC<sup>6)</sup>はこのような考え方を推奨しているようだ。第2式の  $B$  を  $^{12}\text{C}$  とすれば、ここまでの  $A_r(B)$  の定義は第3式に相当する、とわかる。

$$m_u = m_a(^{12}\text{C})/12 (= 1.66 \dots \times 10^{-27} \text{ kg})$$

$$m_a(B) = A_r(B) \times m_u$$

$$A_r(^{12}\text{C}) = 12 \text{ (厳密に)}$$

前段落の IUPAC の相対原子質量などの定義では「相対的」とかの用語の説明は不要であった。その指導の手順を整理してみる：ア) 炭素 12 を基準に選ぶ。その1個の質量を  $m_a(^{12}\text{C})$  と表す。イ) 統一原子質量単位  $m_u$  として、 $m_a(^{12}\text{C})/12$  を選ぶ。ウ) この単位で、要素粒子  $B$  の1個の質量  $m_a(B)$  を測定する。前段落の第2式を得る。エ) このときの数値  $A_r(B)$  を相対原子質量あるいは相対分子質量とよぶ。すなわち、要素粒子の相対質量は現在では、質量の特別な単位として  $m_u$  を選び測定した、要素粒子1個の質量の数値のことである。相対質量には単位がつかないので紛らわしいときには、モル質量  $A_r(B) \text{ g/mol}$  を使えば<sup>16)</sup>よい。

炭素 12 の 1 g を単位  $m_u$  で測定し、その数値を  $N$  とすれば、次の第1式<sup>17)</sup>を得る。仮に、要素粒子を必要な有効桁 ( $N$  程度の大きさで) まで数えられる (個数を人工的に正確にコントロールできる) としてみる。さらに、 $m_u$  を  $x \times 10^{-27} \text{ kg}$  (ここで  $x$  は  $10/6.02 = 1.66$  程度) と厳密に定義する。次に、天秤で質量の測定できる程度の物質  $B$  を用意し、その要素粒子数を仮定によって測定し  $N'$  を得る。すると、この物質の質量  $m(B)$  は、 $x \times 10^{-27} \times N' \text{ kg}$  と測定できたことになる。こうした流れで、キログラム原器に代る単位の制定<sup>14)</sup>が可能となる。同じ仮定の下で、 $n_a(B)$  を  $y \times 10^{-24} \text{ mol}$  (ここで  $y$  は 1.66 程度) と厳密に定義する。質量の場合と同様に、この物質  $B$  の要素粒子数を測定し、 $N'$  を得る。すると、この化学物質の物質質量  $n(B)$  は、 $y \times 10^{-24} \times N' \text{ mol}$  に等しい。化学物質  $B$  のモル質量は  $m(B)$  を  $n(B)$  で割算すれば、 $N'$  が消去されて次の第2式となる。つまり、モル質量  $M(B)$  は定義だけで定まっている。第3式のように、アボガドロ定数<sup>18)</sup>  $N_A$  は  $n_a(B)$  の定義だけで導けるので、逆に、 $n_a$  のかわりに、 $N_A$  を厳密に定義にしてもよい。ここまでで、物質質量の基本的性質、要素粒子1個の量 (amount) はどの要素粒子でも同じ<sup>15)</sup>を使った。例えば、木片を金属製ナットとボルトで組み立てるとする。ナットとボルトの「量」が同じと考えるとき、この量は物質質量に近い。物質質量の考え方のエッセンスは要素粒子を、原子や分子の個別の物理的な性質 (の一部) の違いを超えて、いわば「つぶ」とみなす<sup>19)</sup>ことなのである。

$$m(^{12}\text{C}) = 1 \text{ g} = N \times m_u \text{ (ここで } N = 6.02 \dots \times 10^{23})$$

$$M(B) = (x/y) \text{ g/mol}$$

$$N_A = 1/n_a(B) = N/\text{mol}$$

前出の SI モルの定義「モルは・・・系の物質質量」を、他の類似の言い回しと比べてみる。「モル (mol) は、原子あるいは分子をアボガドロ数  $N$  (約  $6.02 \times 10^{23}$ ) 個だけ集めた集団<sup>7)</sup>」では、「系の物質質量」を「集団」に置き換え、集団そのものをモルとよんでいる。「集団」の後にさらに「の (個) 数」あるいは「の質量」をつける定義<sup>10-13)</sup>もみかける。以下、これらの文

脈をそれぞれ「モルは・・集団」「モルは・・個数」「モルは・・質量」と引用する。

仮に、質量の単位  $g$  を次のように定めたとする：炭素 12 の  $N/12$  個の集団を  $g$  とする。このグラム定義をみると、誰でも半端だと思うであろう。「集団」の次に、肝心の「の質量」が抜け落ちているからだ。これと同じことを「モルは・・集団」の定義でしていることは明らかである。「集団」の後に「の物質質量」を挿入しなければ、モルの定義にはならない。モルをダースで例える仕方<sup>10)</sup>はよくみかけが、ダースは counting unit であり、数そのものである。つまり「モルは・・個数」定義では、モルを物理量とみていないのであろう。「モルは・・質量」定義はかつて、グラム原子やグラム分子とよばれた量<sup>11)</sup>のことで、段落を改めて議論する。これらのモルの定義では、要素粒子 1 個の物質質量<sup>15)</sup>が意識されていないようだ。物質の質量の理解には、目に見える程度の質量から出発し原子 1 個の質量へと向かう道筋と、その逆の道筋があり、どちらの学習も化学では欠かせない。本稿の学習シートその 1 では前者の、その 2 では後者の道筋に対応する。生徒の物質質量理解には、単位を使わない物質質量そのものの説明が要点の一つであろう。

現行の SI モルが定められる (1971) 以前は、グラム原子やグラム分子などが化学では使われていた。この頃の説明文<sup>11)</sup>を引用する。「化学者は、ちょうど商人が大量の石炭を売買する場合に、容量の定まった貨車 1 台分について値段を定めるように、原子の一定数の集団を考えて、その質量を求め、それを標準として、物質の変化の量的関係を論じる。化学者は  $6.02 \times 10^{23}$  個の原子の集団の質量 (グラム単位で表わす) を 1 モルと定義する。たとえば、鉛原子の 1 モルは 207.2  $g$  である。」グラム分子というモルは質量の単位で表されていて、質量の次元に属することになる。そこで、当時のモル計算は、物質の質量 (の数値) をグラム原子やグラム分子 (の数値) で割算すれば、モル単位の数値が求められて、その数値に単位の mol を添える方式であった。グラム分子の時代には、物質質量の (質量とは異なる) 次元が意識されていなかったのである。グラム分子は古典となったはずだが、現在も生き残って<sup>13)</sup>いる。

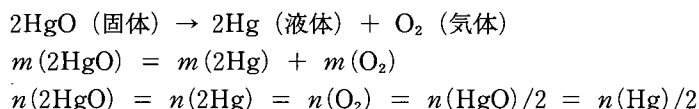
歴史上の当量<sup>20)</sup>は、原子量÷原子価に等しい量であった。そのまま現代風の  $A_r$  を使えば、酸素元素の原子量を  $A_r(O) = 16$  とすれば、この酸素元素の当量は  $A_r(O)/2 = 8$  であった。現在の IUPAC<sup>6)</sup>では、要素粒子として  $(1/2)O$  を選べる。そこで、酸素元素の当量は  $A_r(1/2 O)$  となる。当量にグラムを付けたグラム当量もかつては、広く使われていた。酸化還元反応<sup>21)</sup>では、水素 2 モルは酸素 1 モルに相当するので、 $2H \equiv O$  と書くことがある。当量でみれば 1 : 1 で反応する。そこで、モルよりも当量やグラム当量が見やすいとして使われてきたのである。しかし、現在では異なる物質の物理量として、等号で結ぶ<sup>22)</sup>には物質質量が最適である。ただし、現代の物質質量では、要素粒子に小数・分数も使える<sup>19)</sup>ことを生かす必要がある。

モルとモルに関連する量は、ずいぶん意味が変わってきたことがわかる。モルは、使われだした前世紀ではグラムモルの省略形であった。物質質量は、SI モルの定められた今世紀 70 年代に至って、質量とは (次元の) 異なる物理量と認識されたのであった。歴史的にみれば、化学界には大きな変遷があったのである。学習シートでは、生徒が「モルは・・集団」「モルは・・個数」「モルは・・質量」などの解釈に惑わされないように配慮してある。

### 3 化学の法則としての量バランス式について

化学学習のどの段階で物質質量を導入すべきだろうか。化学では「化学物質の世界」において、物質の個々の要素粒子を意識して考える。物質質量は要素粒子を前提とする物理量であり、要素粒子は「原子・分子の世界」のものである。そこで、物質質量学習は原子・分子の導入後<sup>23)</sup>が自然であろう。一方、化学物質は目で見えて直接あつかえる量 ー天秤やピペットで質量や体積を測れる程度の巨視的な量ーの世界のものである。化学物質から原子・分子への中等化学教育における導入法則は、定比例則、倍数比例則、気体反応則など<sup>24)</sup>であった。そこで、これらの法則を定量的にあつかうときが、物質質量の導入時期の候補となる。すると、以下のように「化学物質の世界」から「原子・分子の世界」が垣間見られる<sup>4,25)</sup>のである。

酸化水銀の分解反応を取り上げる。第2式は三者間の典型的な関係、質量保存則、である。反応物と生成物とを数値で  $m(2\text{HgO})/\text{g}$  と  $m(2\text{Hg})/\text{g}$  と  $m(\text{O}_2)/\text{g}$  とし、反応物を例えば、434 とすれば、生成物は 402 と 32 となる。これら質量の3項を個別に等号<sup>22)</sup>で結べないが、物質質量でみれば、化学量論式は直ちに次の第3式「物質質量バランス式」を与える。



化学計算の典型例<sup>16)</sup>は、物質が反応するとき、一方の物質の質量を与えておいて、他方の物質の所用質量を問う<sup>26)</sup>ものである。例えば、酸化水銀  $\text{HgO}(\text{II})$  50.1 g から生成される気体酸素の質量  $x$  を求める。解答者には、 $M(\text{Hg}) = 201 \text{ g/mol}$  と  $M(\text{O}) = 16.0 \text{ g/mol}$  が与えられ、化学量論式は既知とする。まず、要素粒子  $2\text{HgO}$  のモル質量  $2 \times 217 \text{ g/mol}$  を得る。質量をモル質量で割れば物質質量となることに注意して、 $n(2\text{HgO})$  と  $n(\text{O}_2)$  とに代入する。

$$\begin{aligned} 50.1 \text{ g} / (2 \times 217 \text{ g/mol}) &= x / (32.0 \text{ g/mol}) \\ x &= (32.0 \text{ g/mol}) (50.1 \text{ g}) / (2 \times 217 \text{ g/mol}) = 3.69 \text{ g} \end{aligned}$$

前述の物質質量バランス式から、化学で（化学者）は物質質量とモルをなぜ学ぶ（なぜ必要とする）か、に対する答<sup>4,25)</sup>が読める。物質質量を使えばバランス式が示すように、化学量論式における化学物質間の量的な関係を、化学量論係数こみで直ちに明示できるのである。これは、質量や体積では捉えられない量的関係式である。さらに、バランス式には、原子・分子の世界の量（分母の整数）がはっきりと読み取れる。つまり、化学物質の量（グラム程度の実験値）を物質質量で釣り合わせると、原子・分子の整数が現れるのである。生徒が、化学物質の要素粒子を意識でき、化学の法則を定量的にあつかう時期に物質質量をすみやかに導入する必要がある。

物質質量の導入順序は、最近の高校教科書<sup>7)</sup>のどれも似ている。物質の構成要素として、原子と分子を学習ずみとして、まず、原子量や分子量を説明する。次に「原子・分子・イオンなどの  $6.02 \times 10^{23}$  個の集団を、物質質量が1モル (mol) である」といい、物質質量はこの「モルを使って測られる物質の量」という。このように整理すれば、高校教科書の循環論法がよく見える。

続けて、2 mol の  $\text{H}_2\text{O}$  が分解して 2 mol の  $\text{H}_2$  と 1 mol の  $\text{O}_2$  が生成する、と化学反応の定量性を説明する。この流れでは、モルを使って説明するので、物質質量バランスが見えにくい。前出の酸化水銀の物質質量バランス式では、化学物質における実際の量(要素粒子の個数やモル)に縛られていないことにも注意しよう。化学物質において、原子・分子の数が膨大なので物質質量を導入するともいわれるが、本稿では、この「膨大」もモル導入の根拠にはしない。

数概念における一対一対応の働きは、要素の属性に関係がないこと、要素の配置に関係がないこと、集合の他の属性からの分離、と三点<sup>27)</sup>にまとめられている。これらは、物質質量における一対一対応の利用では、次のように読み替えられるであろう。物質質量は要素粒子のもつ物理的・化学的性質に無関係であること、物質質量は要素粒子の(化学物質内の)結合や配置には無関係であること、物質質量は化学物質の他の属性(質量とか体積とか)から分離された(化学物質の)属性であること。つまり、物質質量のこれら(つづ)の性質<sup>19)</sup>は、要素粒子間の一対一対応によって描かれるのである。酸化水銀の化学量論式を振り返ってみよう。固体酸化水銀  $\text{HgO}$  が分解し、液体水銀  $\text{Hg}$  と気体酸素  $\text{O}_2$  が生成した。要素粒子が化学量論係数こみで一対一対応していて、直ちに物質質量バランス式が求められた。化学物質の量的関係を知ろうと(物質質量を比較)するとき、一対一対応が有効な手段<sup>4)</sup>なのである。以下の学習シートでは、要素粒子を数えないで物質質量を比較する方法として、一対一対応を使う。

こうして、物質質量学習の三要点<sup>28)</sup>は、要素粒子の特定と比較法としての一対一対応と単位を使うときの質量からの換算、となる。そこで、物質質量の単元では、化学法則としての物質質量バランス(釣り合い)を折り込みながら、これらの要点を展開することになる。こうした流れをはっきりと意識して、高校の教室で実際に使う生徒用学習シート(学習骨子)を作成してある。

#### 4 学習シートの骨格について

生徒用として物質質量学習の入口を2ヶ所、用意する。その1では、巨視的(マクロな)量としての物質質量とその測定法から出発する。その2では、要素粒子1個の微視的(ミクロな)量から順次、導入していく。

(生徒用その1) 物質質量とモルについて

##### A. 物質質量の考え方と使い方

われわれは、身の回りの化学物質の世界で、質量  $m$  や体積  $V$  などの化学物質の量を測定してきた。手に触れる化学物質も極微の世界では、原子・分子などの粒子でできていると学んだ。化学物質の世界と極微の世界とをつなぐ量として、物質質量を学習する。水の質量測定では、天秤を使って別の物体(分銅)の質量と比べる。水の体積を知るには、別の物体の体積(メスシリンダーなど)を使い、比べる。では、化学物質の物質質量を比べ測るにはどうするか?

化学物質の粒子をあつかうとき、まとめたり分けたりして「ひとまとめのかたまり」を考える。それを要素粒子という。要素粒子を示すには、化学記号を使う。

問: ある量の水が、天秤の1グラム分銅 18 個分と釣り合ったとする。このことを、質量の記号と水の分子式を使い表してみよう。答)  $m(\text{H}_2\text{O}) = 18 \text{ g}$  と書く。

問：前問で、水分子二つを一つの要素粒子としてみよう。答)  $m(2\text{H}_2\text{O}) = 18 \text{ g}$  となる。

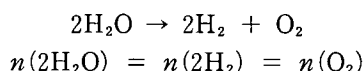
化学物質の量の「はかり方」で、要素粒子の種類が違って同じ量とみなすとき、その量を物質質量という。記号として  $n$  を使う。物質質量は、質量・体積・個数とは別の量である。

問：ダンボール箱 3 個に、順に、B, C, BC とラベルが貼ってある。箱 B にはボールペン B が、箱 C にはキャップ C が多量に入っていて、残りの箱 BC は空である。B と C とを 1 個ずつ取り出して、キャップ付きボールペン BC をつくり、箱 BC に入れる。この操作を繰り返したところ、ちょうど箱 B と箱 C が空になった。ダンボール箱の文具の量を、物質質量の記号で表してみよう。答)  $n(\text{B}) = n(\text{C}) = n(\text{BC})$  となる。

問：どのような気体でも、希薄で同温同圧同体積ならば、気体分子は同数である。この法則を物質質量で言い換えてみよう。答)「同数」を「同物質質量」と読み替えればよい。

問：ちょうど中和する塩酸 HCl と水酸化ナトリウム NaOH 水溶液がある。このときの酸塩基の量を物質質量で釣り合わせてみよう。答)  $n(\text{HCl}) = n(\text{NaOH})$  となる。

水の分解反応を考える。水分子 2 個から、水素分子 2 個と酸素分子 1 個が生まれる。このとき、三種類の化学物質の物質質量は釣り合っている。



問：上の反応で、物質質量の釣り合いを  $n(\text{H}_2\text{O})/2 = n(\text{H}_2)/2 = n(\text{O}_2)/1$  と書いた。正しいか？

まとめ) 化学物質の物質質量は  $n(\text{B})$  のように、要素粒子 B (化学記号) を特定して書く。化学物質の物質質量を比べるには、要素粒子の間で対応させて考える。

## B. 単位としてのモルの使い方

物質質量を測るときの単位は、炭素 12 の 12 g (厳密に) 中の原子数と同数の要素粒子からなる系の物質質量のことである。この単位をモル (記号は mol) とよぶ。モルを使って化学物質 B の物質質量を測定するには、要素粒子 B と要素粒子  $^{12}\text{C}$  とを一対一対応させる。

問：炭素  $^{12}\text{C}$  の 24 g は何モルか？ 答)  $n(^{12}\text{C}) = 2.0 \text{ mol}$  となる。

問：水  $\text{H}_2\text{O}$  が 2.0 mol 分解したとして、水素  $\text{H}_2$  と酸素  $\text{O}_2$  の物質質量を求めよう。

答)  $n(\text{H}_2) = 2.0 \text{ mol}$  と  $n(\text{O}_2) = 1.0 \text{ mol}$  となる。

問：エタノール  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$  2.0 mol の水素原子の物質質量を求めよう。答)  $n(\text{H}) = 12 \text{ mol}$  となる。

注) どの化学物質も 1 mol 中の要素粒子数は同じ。科学者が測定したその数は、 $6.02 \times 10^{23}$  (近似値) であった。 $N_A = 6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$  と表し、 $N_A$  をアボガドロ定数とよぶ。

まとめ) 化学物質の物質質量  $n(B)$  を, モルを使って測定したとき,  $n(B) = a \text{ mol}$  と書く。

### (生徒用その2) 物質質量とモルについて

#### A. 物質質量の考え方と使い方

われわれは, 手に触れる化学物質も, 極微の世界では原子・分子などの粒子でできていると学んだ。化学物質をつくる粒子をあつかうとき, まとめたり分けたりして「ひとまとめのかたまり」を考える。それを要素粒子という。要素粒子は, 種類が違えば性質が違うが, ここで, 要素粒子 1 個ではどの要素粒子でも同じ量, とみなすとする。この量を物質質量という。要素粒子  $B$  の 1 個の物質質量を  $n_a(B)$  と表す。

問: 要素粒子の例を思い出してみよう。答)  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NaCl}$ ,  $2\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $^{12}\text{C}$ ,  $\text{Na}$  など。このように, 化学記号を使って要素粒子を示す。

問: エタノール  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$  中の要素粒子を選び, 物質質量間の関係を表してみよう。

答)  $n_a(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}) = n_a(2\text{C}) = n_a(\text{H}) = n_a(\text{OH}) = n_a(\text{O}) = n_a(\text{C}) = \dots$  となる。

問: 水の分解反応  $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$  中の要素粒子の物質質量を釣り合わせてみよう。

答)  $n_a(2\text{H}_2\text{O}) = n_a(2\text{H}_2) = n_a(\text{O}_2) = n_a(\text{H}_2\text{O}) = n_a(\text{H}_2) = \dots$  となる。

問: 薄い溶液の凝固点降下度は溶質の濃度に比例する。この法則を物質質量で考えてみよう。

答) 溶質分子を  $B$  と  $C$  とすれば,  $n_a(B) = n_a(C)$  で, 溶質の種類は無関係となる。

要素粒子  $B$  を  $x$  個集めた化学物質の物質質量を  $n(B)$  と書く。すると,  $n(B)$  は要素粒子の物質質量の和  $x \times n_a(B)$  に等しい。この  $n(B)$  は, 質量  $m$  や体積  $V$  や個数のどれとも違う。

問: ある量の水の物質質量を記号では  $n(\text{H}_2\text{O})$  と表す。一方, この水の要素粒子を  $2\text{H}_2\text{O}$  と選ぶときの物質質量を,  $n(2\text{H}_2\text{O})$  とする。両物質質量を等号で結んでみよう。

答)  $n(\text{H}_2\text{O})/2 = n(2\text{H}_2\text{O})$  あるいは  $n(\text{H}_2\text{O}) = 2n(2\text{H}_2\text{O})$  となる。

問: 前出の水の分解反応において, 物質質量  $n$  で釣り合わせてみよう。

答)  $n(\text{H}_2\text{O})/2 = n(\text{H}_2)/2 = n(\text{O}_2) = \dots$  となる。

まとめ) どの要素粒子でも 1 個の物質質量は同じ。要素粒子  $B$  の  $x$  個の化学物質の物質質量  $n(B)$  は,  $n(B) = x \times n_a(B)$  となる。物質質量を比べるには, 要素粒子間で対応させて考える。

#### B. 単位としてのモルの使い方

炭素 12 の 12 g (厳密に) 中の原子の数を  $N$  とする。要素粒子  $B$  の  $N$  個の集合の物質質量をモル (単位記号は  $\text{mol}$ ) という。モルを使って化学物質の物質質量を測定するには, 化学物質とモルとの要素粒子間で一対一対応させる。



注) 科学者が測定した  $N$  は、 $6.02 \times 10^{23}$  (近似値) であった。そこで、 $n_a(B)$  は次のようになる。なお、 $N/\text{mol}$  をアボガドロ定数  $N_A$  とよぶ。

$$n_a(B) = 1 \text{ mol}/N = (1/6.02) \times 10^{-23} \text{ mol}$$

問: 炭素  $^{12}\text{C}$  の 24.0 g 中の  $^{12}\text{C}$  の数は  $N$  の何倍か? 答) 2 倍。

問: 気体水素  $\text{H}_2$  の 2.00 mol が酸素と反応したとき、水  $\text{H}_2\text{O}$  は何モル生成されるか?

答)  $n(\text{H}_2\text{O}) = 2.00 \text{ mol}$  となる。

問: エタノール  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$  の分子  $2N$  個は、何モルか? 答)  $n(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}) = 2 \text{ mol}$  となる。

まとめ) 化学物質 B の物質質量  $n(B)$  をモルで測定したとき、 $n(B) = a \text{ mol}$  と書く。

(生徒用その 3) 要素粒子の相対質量とモル質量について

要素粒子  $^{12}\text{C}$  の 1 個の質量を、 $m_a(^{12}\text{C})$  とすると、その  $1/12$  が要素粒子 1 個の質量の単位  $m_u$  である。この  $m_u$  を単位として要素粒子 B の 1 個の質量  $m_a(B)$  を測定したときの数値を  $A_r(B)$  と書く。 $A_r(B)$  を原子量や分子量 (相対原子質量や相対分子質量) とよぶ。

$$12 \text{ g} = N \times m_a(^{12}\text{C}), m_a(B) = A_r(B) \times m_u$$

問: 科学者が、自然界の炭素元素 C や水素元素 H や酸素元素 O を測定したら、 $A_r(\text{C}) = 12.01$ ,  $A_r(\text{H}) = 1.001$ ,  $A_r(\text{O}) = 16.00$  であった。水  $\text{H}_2\text{O}$  の分子量を表してみよう。分子  $\text{CO}_2$  ではどうか? 答)  $A_r(\text{H}_2\text{O}) = 18.00$  と  $A_r(\text{CO}_2) = 44.01$  となる。

物質 1 mol 分の質量をモル質量とよび、記号  $M$  で表す。そこで、ある物質の要素粒子を B とすれば、次のようになる。

$$M(B) = m(B)/n(B) \text{ あるいは } M(B) \times n(B) = m(B)$$

問: 硬貨を数えるための銭枮 (ぜにます) は大根のおろしがねに似た形の板である。枮 (さん) で方形に仕切った枮目が  $N$  個あって、枮目ごとに硬貨が 1 枚だけ入る。この板で硬貨 A と硬貨 B を数えてそれぞれ、 $x$  杯と  $y$  杯あったとする。硬貨 1 枚の質量を  $m_a$  とし、硬貨を集めた質量を  $m$  とし、両者の関係を式で表してみよう。

答)  $m(A) = x \times m_a(A) \times N$  と  $m(B) = y \times m_a(B) \times N$  となる。

問: 前問をまず、物質量の記号  $n$  と  $n_a$  とで表してみよう。次に、 $M(A) = m(A)/n(A)$  と  $M(B) = m(B)/n(B)$  とを計算して、相対質量  $m_a(A)/m_a(B)$  との関係を探してみよう。ただし、 $n_a(A) = n_a(B)$  とする。

答) まず、 $n(A) = x \times n_a(A) \times N$  と  $n(B) = y \times n_a(B) \times N$  となる。故に、 $m_a(A)/m_a(B) = M(A)/M(B)$  となる。

水  $\text{H}_2\text{O}$  と炭素  $^{12}\text{C}$  の物質が 1 mol 分あれば、これらの質量の比は、要素粒子を一対一対応させてみると、相対質量の比  $A_r(\text{H}_2\text{O})/A_r(^{12}\text{C})$  に等しいことがわかる。そこで、次式を得る。さらに、 $A_r(^{12}\text{C}) = 12$  (厳密に) と  $M(^{12}\text{C}) = 12 \text{ g/mol}$  (厳密に) とを代入して、第 2 の式を得る。一般的に、 $M(\text{B}) = A_r(\text{B}) \text{ g/mol}$  と書ける。

$$\begin{aligned} A_r(\text{H}_2\text{O})/A_r(^{12}\text{C}) &= M(\text{H}_2\text{O})/M(^{12}\text{C}) \\ M(\text{H}_2\text{O}) &= A_r(\text{H}_2\text{O}) \text{ g/mol} \end{aligned}$$

問：気体酸素  $A_r(\text{O}_2) = 32.0$  のモル質量を求めよう。答)  $M(\text{O}_2) = 32.0 \text{ g/mol}$  となる。

問：気体水素  $A_r(\text{H}_2) \text{ g}$  と気体酸素  $A_r(\text{O}_2) \text{ g}$  の分子数を比べよう。答) 同じ。

問：科学者が多くの気体 (0 °C, 1 atm) のモル体積  $V_m$  を測定したら、ほぼ 22.4 L/mol であった。この条件で  $m(\text{O}_2) = 64.0 \text{ g}$  の体積を求めよう。答)  $V(\text{O}_2) = 44.8 \text{ L}$  となる。

まとめ) 物質量の測定で、要素粒子間の対応をそのまま使うのは実用的でないので、質量  $m(\text{B})$  を測定して、 $n(\text{B}) = m(\text{B})/M(\text{B})$  と換算する。このとき、 $A_r(\text{B})$  は既知とする。

## 註 と 文 献

- 1) この原理の含意は、森川鐵朗・伊藤真人『化学と教育』49(8), 523-524 (2001) に詳しい。大川 忠「原子・分子の質量の表し方についての試案」同誌 43(6), 403-404 (1995) では「日本化学会では (中略) 物理量の表し方として数値と単位の積で表すことを推奨している。そうすると、相対質量として表される原子量や分子量は、物理量ではないことになる」とあるが、これは誤解である。物理量=数値×単位は、どのような物理量でもそのように表されるという意味ではない。なお、物理量をあつかう三原理の議論は、T. Morikawa and B. T. Newbold, *KHIMIYA* (ISSN 0861-9255), 11(6), 453-458 (2002) にある。
- 2) 単位導入の四段階は、遠山 啓編『現代化数学指導法事典』明治図書 (1971) I. 量から数へ, pp. 2-28 による。
- 3) 銀林 浩『量の世界 — 構造主義的分析』むぎ書房 (1975) 第 1 章によれば、量 (quantity) とは、互いに比較可能で (比較可能性) かつ、比較した際の違いがまた比較できる (差異の相等化) ような、物の「1 側面」のことである。さらに、アルキメデスの公理をみれば、量がいくら大きくても単位がいくら小さくても「測定しうる」ことになる。
- 4) モルの次元の構成法や物質量の比較法と量バランス法などについては、森川鐵朗・田口 哲『上越教育大学研究紀要』20(2), 535-548 (2001) で論じた。塩酸と水酸化ナトリウムの試薬びんが 1 本ずつあるとして、物質量を  $n(\text{HCl})$  と  $n(\text{NaOH})$  とする。右辺に同じ  $n(\text{H})$  が現れる二つの式、 $n(\text{HCl}) = n(\text{H})$  と  $n(\text{NaOH}) = n(\text{H})$  は、共に正しいが、要素粒子間の対応がない (中和するか不明な) ので、両式を等号で結べない。
- 5) SI モルの定義は、工業技術院計量研究所・監修『国際単位系 (SI) : グローバル化社会の共通ルール』国際文書第 7 版日本語版 (1998) 日本規格協会 (1999) による。
- 6) I. Mills, T. Cvitaš, K. Homann, N. Kallay and K. Kuchitsu, *Quantities, Units and Symbols in Physical Chemistry*, Blackwell Scientific Pub., Oxford, second ed. (1993) と

その第1版の和訳は、日本化学会標準化専門委員会監修／朽津耕三訳『物理化学で用いられる量・単位・記号』講談社(1991)をみる。なお、M. L. McGlashan, "Amount of Substance and the Mole," *Metrologia*, 31, 447-455 (1994/95) での、要素粒子1個の質量記号  $m_e$  (B) は電子質量  $m_e$  とまぎれやすい。そこで本稿では、Mills らの記号  $m_a$  ( $^{12}\text{C}$ ) とそれをまねた  $n_a$  (B) を使う。

- 7) 東京書籍『新編化学 IB』化 B 613 (1998年2月) では「物質の量を粒子の個数で表すと都合がよい・・アボガドロ数個の集団を1モルとする。モルを単位にして原子、分子、イオンなどの量を表したものを物質質量」と定める。その他、循環論法は、実教出版『化学 IB』化 B 525 (1994年1月) などにみられる。大日本図書『新訂化学 IB 教授資料』化 B 614 (1998) では「粒子の数を表すために mol という単位をもった物質質量という概念を導入する」とある。
- 8) 物質質量の名称 'amount of substance' そのものの議論は、G. Gorin, "Chemical Amount or Chemiance; Proposed Names for the Quantity Measured in Mole Units," *J. Chem. Educ.*, 59(6), 508 (1982) や I. M. Mills, "The Choice of Names and Symbols for Quantities in Chemistry," *ibid.*, 66(11), 887-889 (1989) や 前出註6) McGlashan を参照のこと。
- 9) SI モルの定義の源は、E. A. Guggenheim, "The Mole and Related Quantities," *J. Chem. Educ.*, 38(2), 86-87 (1961) あたりで、"The mole is the amount of substance containing the same number of molecules (or atoms or radicals or ions or electrons as the case may be) as there are atoms in 12 grams of  $^{12}\text{C}$ " とある。この表現をモルの定義に引用しながらも、W. F. Kieffer, *The Mole Concept in Chemistry*, Reinhold Pub. Corp., N. Y., fourth printing (1964) では、"The mole is Avogadro's Number of chemical units being considered (p. 4)" と説明する。
- 10) 廣田 稔「単位のはなし 5 化学の単位」『化学教育』34(2), 138-141 (1986) では、SI モルの定義を採用しながらも「モルは原子や分子の個数を表す(ダースのような)単位」と説明する。D. Kolb, "The Mole," *J. Chem. Educ.*, 55(11), 728-732 (1978) も同様。
- 11) グラムモルの説明文は、玉虫文一『物質研究の道程』培風館(1974)の三訂版 p. 12 にみえる。その他、物質質量とその単位 mol は質量の次元に属するとする典型例は『化学大辞典』共立出版、第24刷(1964)「モルは物質の質量を測る単位の一つ。物質の分子量に等しいグラム数の物質の量を1モルという」である。大竹三郎・若林覚編著、講座：現代の自然科学教育2『化学の教育』明治図書(1965)の第I章(大竹三郎)では、「純粋な  $^{12}\text{C}$  の 12 g と同数の原子を含む物質の量」を 1 mol の定義 (p. 26) として、「1 mol の化学量が、分子や原子、イオンの差別なく、 $^{12}\text{C}$  と同様の原子を含む物質質量 (p. 28)」で、「各原子をアボガドロ数だけ含む物質の重さを 1 mol といい、化学量の基本単位となる (p. 31)」と述べている。樋口大成「グラム原子・グラム分子の定義」『化学教育』11(3), 353-356 (1963) では、モルは「数の単位」であり「質量の単位」でもあるという。
- 12) 玉虫伶太他編『エッセンシャル化学辞典』東京化学同人(1999)の「モル」の項では「実際に取扱う物質の量を、その物質をつくっている要素粒子の数で表したのでは数値が大きすぎて不便である。そこで、質量数 12 の炭素 0.012 kg 中に含まれる  $^{12}\text{C}$  の数と同じ数の要素粒子を1モルと定義」とある。この定義の「同じ数の要素粒子」に続いて「の物質質量」を挿入しなければ、モルが物質質量という次元に属することが明確にならない。
- 13) グラム分子をモルとよぶなごりは最近の出版物にもみられる。例えば、ある大学受験予備

校の問題集では、基本の計算式は「モル＝質量／分子量」と主張する。塩化ナトリウム  $\text{NaCl}$  の 93.6 g の物質量を求めるとき、質量の数値を式量 58.4 で割算して、1.60 を得て、答は 1.60 mol, と mol を添付する。この方法はまさに、古典的なグラム分子である。現代では、93.6 g を塩化ナトリウムのモル質量 58.4 g/mol で割算して物質量を求める。上の基本の計算式は「物質質量＝質量／モル質量」あるいは単位を使うならば「mol = g/(g/mol)」と書き換える。

- 14) P. Seyfried and P. Becker, "The Role of  $N_A$  in the SI: An Atomic Path to the Kilogram," *Metrologia*, 31, 167-172 (1994) では、キログラム原器に代る質量の定義の現状を議論している。なお、朽津耕三・田中 充「アボガドロ定数」『化学と教育』46(10), 636-640 (1998) では、アボガドロ定数の測定の信頼度がもう 2 桁向上すれば、モルの定義は「 $\cdot \cdot$  個の要素粒子の物質質量」となるであろうと予想している。
- 15) 物質量の最小単位などは、森川鐵朗『化学と教育』51(2), 142-143 (2003) で議論した。
- 16) 森川鐵朗・一色健司『上越教育大学研究紀要』21(1), 343-358 (2001) では、物理量（特に、物質質量）の解法（量バランス法）も詳細に論じてある。この解法の質問が高校現場から筆者に寄せられた。高校では、固体の溶解度を水 100 g に溶解する溶質の質量と定め、問題を比例計算で解く。例えば、塩化ナトリウムは水 (25 °C) 100 g に 35.9 g 溶解するとして、水 0.450 kg では何グラム溶けるか、と問う。求める溶質を  $x$  グラムとし、質量の単位をそろえて、次の第 1 式のような比例式を立てる。一方、この論文の解法では、物理的意味を常に考え立式する。まず、求める溶質の質量を  $x$  とする。このとき、 $x$  そのものを（数値ではなく）物理量として選ぶことが肝要である。次に、問題中の二種類の水、100 g と 0.450 kg, において、釣り合わせるための物理量 (PQE) をさがす。溶解度がそれなので、第 2 式を得る。この立式法では、溶解度の物理的な意味、つまり、水の量がいかほどでも溶解度（示強性）は同じ、両辺は同じ溶解度と述べている。比例式による立式法では、溶解度の物理的な意味を考慮していないので、数学の比例計算演習になる。

$$35.9 : x = 100 : 450$$

$$35.9 \text{ g} / (100 \text{ g}) = x / (0.450 \text{ kg})$$

寄せられた別の問題は、あるテレビ番組で放送されていたという。「3 分（ふん）の 2 分（ふん）間に容器に 6 分（ふん）の 5 リットルの水が入った。では 1 分間には何リットル入るか。」期待される数学の解法は、 $(5/6)$  を  $(2/3)$  で割算して、その答  $5/4$  にリットルをつけるものである。生徒は整数では割算できるが、このような分数による割算が難しいという主旨であった。科学の問題として、量バランス法で解いてみる。水流の与えられた「強さ」は  $(5/6 \text{ L}) / (2/3 \text{ min})$  である。求める水の量を  $x$  とすると、そのときの水の流入の「強さ」は  $x / (1 \text{ min})$  と書ける。両方の「強さ」は等しいので、第 1 式を得る。両辺に 1 min を乗算して「強さ」を体積に変換すれば、第 2 式を得る。生徒は、割算の意味として「整数個に分割すること」と教えられてきたので、分数や小数の割算では迷ってしまうのであろう。

$$x / (1 \text{ min}) = (5/6 \text{ L}) / (2/3 \text{ min})$$

$$x = (1 \text{ min}) (5/6 \text{ L}) / (2/3 \text{ min}) = (5/4) \text{ L}$$

- 17) ここでの第1式と第3式は, R. C. Rocha-Filho, "On the Name for the Number of Atoms in 12 g of Carbon-12," *J. Chem. Educ.*, 69(1), 36 (1992) にみえる。
- 18)  $N_A$  の古い実測法は, A. A. Sunier, "Some Methods of Determining Avogadro's Number," *J. Chem. Educ.*, 6(2), 299-307 (1929) にある。最近の方法は, 註6) McGlashan など。
- 19) 化学の古典的諸法則とモルのかかわり, G. N. Copley, "The Mole in Quantitative Chemistry," *J. Chem. Educ.*, 37(11), 551-553 (1961) は, 物質量の「量」の理解に「つぶ」の概念が欠かせないことを示唆している。「つぶ論」は, 森川鐵朗『上越教育大学研究紀要』7(3), 93-99(1988)を参照のこと。註6) Mills のモルの使用例には「 $\text{Fe}_{0.91}\text{S}$  の 1 mol は 82.88 g」などとみえる。註6) McGlashan の混合物の例にならうと, モル分率で水 0.9 にメタノール 0.1 を混合すると, 物質量は  $n(0.9\text{H}_2\text{O} + 0.1\text{CH}_3\text{OH})$  と表される。物質量は, つぶとして実在しなくても化学物質全体での割合が特定できるならば, 適用できる。本稿の学習シートでは, 高校生の要素粒子の理解はつぶまででよい, とした。
- 20) 当量と原子量の簡略史は, 日本化学会編『化学史・常識を見直す — 教科書の誤りはなぜ生まれたか』講談社 (1988) の第6章 (小塩玄也) で議論されている。酸素元素の平均原子量 16 を基準に (厳密に) 選ぶと, 化学元素の当量は酸素を 8 とした化学量論式で求められる。このあたりの化学計算は, 千葉善陸『物理化学演習』培風館 (1953) 第1章などにある。
- 21) 守永健一『酸化と還元』裳華房 (1972) 基礎化学選書9の第2章, p. 28 など。
- 22) 物理量の授業では, 等号のあつかい方に注意する。西洋からの自然科学や数学では, 式ごとに等価とみなす対象が違っていても, ひとつの記号 (=) ですませて, 対象の違いの識別は読者にまかせる。つまり, 物理量, 数, 操作, 集合, どれでも, 等価とみなすものを同じ等号で結ぶ。日本の教科書で, 物理量と数とで別の等号を使い分ける説明をみかけるが, 何万という漢字を駆使する日本人の感覚かもしれない。物理量の等号にも, 数学でいう「恒等式」と「方程式」の使い方の違いがある。
- 物理量の記号は, 自然科学の分野や学会独自に使われることがある。例えば, 明石知子ら編『マススペクトロメトリーってなあに』日本質量分析学会 (2001) では, 相対分子質量  $M_r$ , 整数質量  $M_n$ , 精密質量  $M_o$  などと使い分けている。 $M_r$  は化学元素に対する相対質量のことで, 化合物の塩化ナトリウム  $\text{NaCl}$  では「 $M_r$  58.44」と書く。同位体組成に応じて  $\text{Na}^{35}\text{Cl}$  では「 $M_o$  57.9586」のように, やはり質量記号と数値にスペースをはさんで並置する方式を採用している。一方, IUPAC の推奨 (註6) では, 上記の相対質量は順に,  $A_r(\text{NaCl}) = 58.44$ ,  $A_r(\text{Na}^{35}\text{Cl}) = 58$ ,  $A_r(\text{Na}^{35}\text{Cl}) = 57.9586$  となる。つまり, 質量記号は  $A_r$  ひとつのみで, 要素粒子をはっきりと書き込み等号を使う。なお, 明石らの第7章では「化学分野では化合物の量を1モルあたりの質量で考えることが多いため, 化合物の平均質量の単位に  $\text{g/mol}$  が使われることもあります」とある。単位  $\text{g/mol}$  は化学元素以外にも使うもので, これは誤解であろう。
- 23) 日本での原子論的な化学教育開始の議論は, 三井澄雄「日本における原子論的な中等化学教育の始まり」『化学史研究』化学史研究会, 第1号 pp. 38-41 (1974) にみえる。亀高徳平の化学教科書出版年を教材の配列順序にしたがって3期に分けている。まず, 1902-1905年では, 分子量・原子量 → 元素記号・分子式 → 分子・原子説であり, 次に 1911-1923年では, 分子・原子説 → 分子量・原子量 → 元素記号・分子式であり, 最後に 1931-1935年で, 分子・原子 → 原子記号・分子式 → 原子量・分子量, であったという。分子・原

子概念は、第1期では仮説であり、第3期に至り実在となったという。

- 24) 森川鐵朗・鐸木啓三『化学教育』27(1), 64-67 (1979) など。三井澄雄『化学教育入門—教材の基礎と授業の方法』新生出版 (1987) 第6章でいう：定比例の法則とは「与えられた化合物の構成元素の重量比はつねに一定である」と主張しているのであって「物質は化学反応において一定の割合で反応する」ではない。この法則「化合物の組成が一定」と「物質の原子論」とから「化合物においては成分原子の数の割合は一定」となる。
- 25) T. Morikawa, *CHEM NZ*, 87, 10-13 (2002) も参照のこと。
- 26) 物質質量を利用しない方法として、大竹三郎・若林覚編著、講座：現代の自然科学教育2『化学の教育』明治図書 (1965) の第V章 (三井澄雄) では、1 g あたりから求める方法を提案している。これは、アメリカの化学教科書などでよく使われる FL (factor label) 法のことである。まず、酸化水銀 1 g から生成される気体酸素は  $32.0 \text{ g} / (2 \times 217 \text{ g})$  とファクタを求め、問題の要求は酸化水銀 50.1 g だからと掛算する。FL 法の問題点については、T. Morikawa and B. T. Newbold, *Bull. Joetsu Univ. Educ.*, 18(2), 667-672 (1999) を参照のこと。
- 27) 数における一対一対応は、銀林 浩『数の科学—水道方式の基礎』むぎ書房 (1975) 第1章による。
- 28) 高校生の一対一対応や物質質量学習の要点などは、広瀬庄一・森川鉄朗『化学と教育』48(11), 752-755 (2000) で議論されている。

## Methods and Developments for the Teaching of 'Amount of Substance' and the Mole

Tetsuo MORIKAWA\* and Hidetoshi KASHIDA\*\*

### ABSTRACT

This paper firstly reviews methods and developments for teaching 'amount of substance' and the mole, and secondly suggests a new set of sheets for student learning. The process of learning the mole in the set violates the tradition of chemistry textbooks in Japan. The background is based on both 'a physical quantity is the product of a numerical value and a unit' and 'amount balance'; the former is the basic principle in quantity calculus, and the latter is a way of balancing between amounts of substances in the chemical world. The set deals with the concept of elementary entity in the first step in the learning process. In the second step, 'amount of substance' is defined as follows: The 'amount of substance' of one elementary entity is the same for every elementary entity, even if they are different in kind from one another; and the 'amount of substance' of a system that contains elementary entities is equal to the summation of the amounts of the elementary entities. A variety of laws in chemistry are described as amount balance in the third step, and then the way of amount balance makes it possible for students to measure a given amount of substance in terms of the mole. The set of sheets in the last step introduces students to the concepts of relative atomic mass and molar mass.

---

\* Department of Chemistry, Joetsu University of Education, Joetsu 943-8512, Japan

\*\* Senior High School Attached to the Faculty of Education, Kanazawa University, Kanazawa 921-8173, Japan